



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AEROPÊNDULO, PROTOTIPAGEM E SIMULADOR GRÁFICO COMO
FERRAMENTA PARA ESTUDO DE TÉCNICAS DE CONTROLE E
IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS**

OSÉIAS DIAS DE FARIAS

Tucuruí-PA
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

OSÉIAS DIAS DE FARIAS

**AEROPÊNDULO, PROTOTIPAGEM E SIMULADOR GRÁFICO COMO
FERRAMENTA PARA ESTUDO DE TÉCNICAS DE CONTROLE E
IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao colegiado da Faculdade de Engenharia Elétrica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito necessário para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira

Tucuruí-PA
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AEROPÊNDULO, PROTOTIPAGEM E SIMULADOR GRÁFICO COMO
FERRAMENTA PARA ESTUDO DE TÉCNICAS DE CONTROLE E
IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS**

AUTOR: OSÉIAS DIAS DE FARIAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO À BANCA EXAMINADORA APRO-
VADA PELO COLEGIADO DA FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JUL-
GADO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira
Orientador / UFPA-CAMTUC-FEE

Prof. Dr. NOME PRIMEIRO AVALIADOR
Membro 1 / UFPA-CAMTUC-FEE

Prof. Dr. NOME PRIMEIRO AVALIADOR
Membro 2 / UFPA-CAMTUC-FEE

Resumo

Resumo aqui

Palavras Chave: .

Abstract

Texto do abstract (inglês)

Keywords: Palavras chave em inglês.

SUMÁRIO

Resumo	iv
Abstract	v
Sumário	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivos Gerais	1
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Escopo do Trabalho	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Modelagem e Controle de Sistemas	4
2.1.1 Transformada Laplace	4
2.1.2 Transformada Z	4
2.1.3 Espaço de Estados	4
2.2 Identificação de Sistemas	4
2.2.1 Conceitos	4
2.3 Eletrônica Analógica e Digital	4
2.3.1 Eletrônica Analógica	4
2.3.2 Eletrônica Digital	4
3 PROTÓTIPO E SIMULADOR	5
3.1 Prototipagem	5
3.1.1 Parte estrutural do sistema	5
3.1.2 Parte Elétrica do sistema	5
3.1.3 Montagem do Protótipo	5
3.2 Simulador usando Python	5
3.2.1 Linguagem Python	5
3.2.2 Biblioteca VPython	5
3.2.3 Simulador Gráfico	5
4 DESENVOLVIMENTO	6
4.1 Fundamentação Teórica	6

4.2	Modelagem Matemática	6
4.2.1	Modelo Matemático do Motor CC Série	6
4.2.2	Modelo Matemático do Aeropêndulo	10
4.2.3	Junção dos dois Modelos	10
4.3	Modelo do Aeropêndulo por Identificação de Sistemas	10
5	PROJETO DE CONTROLADORES	11
5.1	Projeto de Controle por LGR	12
5.1.1	Obtendo o Controlador	12
5.1.2	Discretização do controlador Transformada Z	12
5.1.3	Implementação do Controlador usando o Arduino Nano	12
5.2	Projeto de Controle por Espaço de Estados	12
5.2.1	Obtendo o Controlador	12
5.2.2	Discretização do controlador Transformada Z	12
5.2.3	Implementação do Controlador usando o Arduino Nano	12
5.3	Interface Gráfica Plotagem dos Estados do Sistema	12
5.3.1	Obtendo o Controlador	12
5.3.2	Discretização do controlador Transformada Z	12
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
7	CONCLUSÃO	14
7.0.1	Considerações Finais	14
7.0.2	Trabalhos Futuros	14
	REFERÊNCIAS	15

INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Sistemas de controle têm como finalidade modelar, analisar e projetar controladores para que um sistema possa atender a requisitos de projeto específicos. Para atingir esse objetivo, é necessário aplicar técnicas que permitam abstrair o comportamento do sistema em termos de equações matemáticas. No entanto, é importante lembrar que, ao abstrair sistemas físicos dessa maneira, o preço pago está na percepção e interpretação da dinâmica do sistema.

Além disso, a implementação de controladores requer a expertise de diferentes áreas da engenharia, tais como eletrônica analógica e digital, programação, processamento de sinais, circuitos elétricos, entre outras. Dessa forma, torna-se necessário integrar conhecimentos multidisciplinares para a implementação bem-sucedida de controladores em sistemas reais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo mais aprofundado do comportamento dinâmico de um aeropêndulo, utilizando técnicas de sistemas de controle. Para isso, será desenvolvido um projeto completo que integra um protótipo, um simulador e uma interface gráfica para plotagem de gráficos dos sinais em tempo real do sistema. Acrescentando a isso, a proposta é aplicar os conhecimentos obtidos durante a graduação e sintetizar as diferentes técnicas de sistemas de controle em uma planta física, com o intuito de observar o comportamento da dinâmica do sistema. Para essa tarefa, serão mescladas tecnologias de diferentes áreas do curso de engenharia elétrica, o que torna o projeto ainda mais interessante e desafiador.

1.2.2 Objetivos Específicos

1.3 Escopo do Trabalho

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

2.1 Modelagem e Controle de Sistemas

2.1.1 Transformada Laplace

2.1.2 Transformada Z

2.1.3 Espaço de Estados

2.2 Identificação de Sistemas

2.2.1 Conceitos

2.3 Eletrônica Analógica e Digital

2.3.1 Eletrônica Analógica

2.3.2 Eletrônica Digital

PROTÓTIPO E SIMULADOR

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

3.1 Prototipagem

3.1.1 Parte estrutural do sistema

3.1.2 Parte Elétrica do sistema

3.1.3 Montagem do Protótipo

3.2 Simulador usando Python

3.2.1 Linguagem Python

3.2.2 Biblioteca VPython

3.2.3 Simulador Gráfico

DESENVOLVIMENTO

4.1 Fundamentação Teórica

O processo que envolve modelagem de sistemas físicos em termos de equações matemáticas é uma das partes mais importante no estudo de sistemas de controle. Segundo [Ogata \(2014, p. 11\)](#), O modelo matemático de um sistema dinâmico é definido como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema com precisão ou, pelo menos, razoavelmente bem.

A dinâmica de muitos sistemas mecânicos, elétricos, térmicos, econômicos, biológicos ou outros pode ser descrita em termos de equações diferenciais. Essas equações diferenciais são obtidas pelas leis físicas que regem dado sistema — por exemplo, as leis de Newton para sistemas mecânicos e as leis de Kirchhoff para sistemas elétricos. Devemos sempre ter em mente que construir modelos matemáticos adequados é a parte mais importante da análise de sistemas de controle como um todo, [Ogata \(2014, p. 11\)](#).

4.2 Modelagem Matemática

4.2.1 Modelo Matemático do Motor CC Série

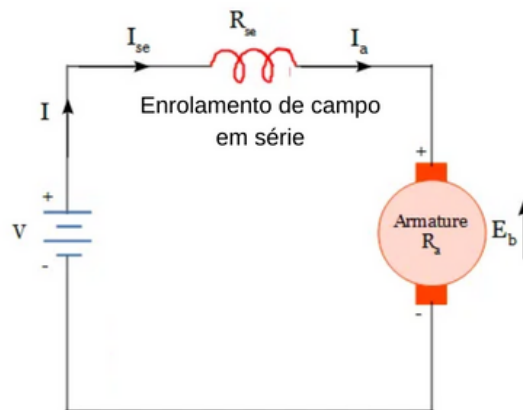
Os motores CC série tem como principal característica possuir o enrolamento de campo em série com o enrolamento de armadura, essa configuração resulta em um motor com torque de partida alto, porém, o torque reduz a medida que a velocidade aumenta devido ao aumento da Força Eletromotriz FEM. Por conda desse aumento de FEM os motores CC Séries tem uma regulação de velocidade ruim, quando se aumenta a carga no eixo do motor a velocidade é reduzida que por sua vez reduz a FEM e então o torque aumenta para conseguir atuar na carga.

No entanto, mesmo motores cc série com dimensões reduzidas geram torques altos com baixo consumo de corrente. Visando melhorar seu desempenho, é possível projetar

controladores de malha fechada capazes de tornar esses motores mais eficientes na questão da regulação de sua velocidade.

A Figura 1 mostra uma diagrama da configuração do motor CC Série, em que o enrolamento de campo está conectado em série com o enrolamento de armadura, dessa forma, a corrente de campo é igual a corrente de armadura $i = i_c = i_a$.

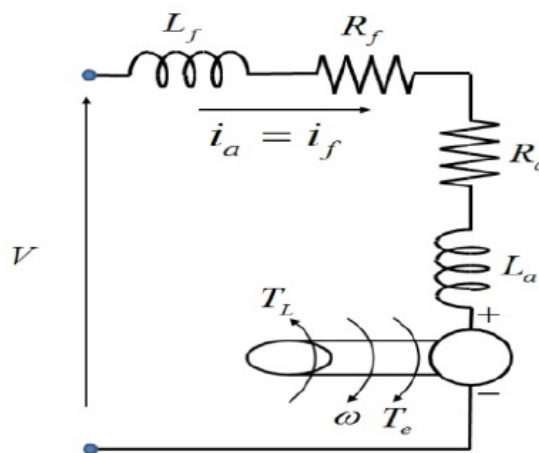
Figura 1 – Motor CC Série.



Fonte – colocar fonte aqui.

Na Figura 2, mostra o diagrama eletromecânico do do Motor CC Série, nele podemos observar que os componentes elétricos estão todos em série, em que o enrolamento de campo possui uma parte resistiva e outra indutiva, assim como o enrolamento de armadura, já a parte mecânica possui uma velocidade angular dada por $\dot{\theta}$, torque eletromagnético do motor dado por T_e e torque da Carga T_c .

Figura 2 – Diagrama Elétrico/Mecânico Motor CC Série.



Fonte – colocar fonte aqui.

Modelagem da Parte Mecânica do Motor CC Série

Primeiramente a parte mecânica do motor será modelada, um motor cc série é composto por uma parte rotativa "armadura", de forma que, essa parte, gera um momento de inércia do eixo do motor J e um fator de amortecimento viscoso b , além disso, o eixo possui uma velocidade angular $\dot{\theta}$.

Assim, a equação que descreve o modelo mecânico do motor CC Série e dados, por:

$$J\ddot{\theta}(t) = T_e(t) - b\dot{\theta}(t) - T_c(t) \quad (4.1)$$

$$T_e(t) = J\ddot{\theta}(t) + b\dot{\theta}(t) + T_c(t) \quad (4.2)$$

Onde:

- T_e : Torque Eletromagnético produzido pelo Motor;
- J : Momento de Inércia do Eixo do Motor;
- $\ddot{\theta}$: Aceleração Angular do Eixo do Motor;
- $\dot{\theta}$: Velocidade Angular do Eixo do Motor;
- b : Fator de Amortecimento Viscoso;
- T_c : Torque de Carga.

Tanto a Força Eletromotriz $E_A(t)$ quanto o Torque Eletromagnético $T_e(t)$ dependem do fluxo magnético do entreferro Φ , assim, temos as seguintes equações:

$$E_a(t) = \dot{\theta}(t)\Phi(i) \quad (4.3)$$

$$T_e(t) = i(t)\Phi(i) \quad (4.4)$$

O Fluxo magnético depende da corrente $i(t)$, assim, a equação (1) é não-linear. Além disso, podemos aproximar o fluxo por uma relação linear K_0 quando se despreza a saturação magnética.

$$\Phi(i) = K_0 i(t) \quad (4.5)$$

A constante K_0 é a indutância mútua entre a armadura e o enrolamento de campo.

Agora podemos encontrar o modelo não-linear da parte mecânica do Motor CC Série, substituindo (5) em (4), temos:

$$T_e(t) = i(t)K_0 i(t) \quad (4.6)$$

$$T_e(t) = K_0 i^2(t) \quad (4.7)$$

Substituindo 4.2 em 4.7, encontramos a modelo da parte mecânica do motor.

$$K_0 i^2(t) = J\ddot{\theta}(t) + b\dot{\theta}(t) + T_c(t) \quad (4.8)$$

Modelagem da Parte Elétrica do Motor CC Série

Para a parte elétrica, vamos usar a lei de Kirchhoff das tensões, como foi dito o motor é um motor CC série, assim, $i_a = i_f$, aplicando Kirchhoff para modelar o sistema elétrico, temos:

$$V(t) = (R_a + R_f)i(t) + (L_a + L_f)\frac{d}{dt}i(t) + E_a \quad (4.9)$$

Onde:

- V : Tensão da Fonte;
- R_a : Resistência da Armadura;
- R_f : Resistência de Campo;
- i_a : Corrente da Armadura;
- i_f : Corrente de Campo;
- E_A : Tensão Contro Eletromotriz Gerada pela Armadura;
- L_a : Impedância da Armadura;
- L_f : Impedância de Campo.

Como temos os componentes elétricos em série, podemos obter uma resistência total assim como uma indutância:

$$R = R_a + R_f \quad (4.10)$$

$$L = L_a + L_f \quad (4.11)$$

$$V(t) = Ri(t) + L\frac{d}{dt}i(t) + E_a \quad (4.12)$$

Substituindo 4.5 em 4.3,

$$E_a(t) = \dot{\theta}(t)K_0i(t) \quad (4.13)$$

Agora podemos encontrar a equação de movimento da parte elétrica do sistema ao substituir 4.13 em 4.12:

$$V(t) = Ri(t) + L \frac{d}{dt}i(t) + \dot{\theta}(t)K_0i(t) \quad (4.14)$$

Equações do Modelo do Motor CC Série.

$$V(t) = Ri(t) + L \frac{d}{dt}i(t) + \dot{\theta}(t)K_0i(t) \quad (4.15)$$

$$K_0i^2(t) = J\ddot{\theta}(t) + b\dot{\theta}(t) + T_c(t) \quad (4.16)$$

4.2.2 Modelo Matemático do Aeropêndulo

4.2.3 Junção dos dois Modelos

4.3 Modelo do Aeropêndulo por Identificação de Sistemas

PROJETO DE CONTROLADORES

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

5.1 Projeto de Controle por LGR

5.1.1 Obtendo o Controlador

5.1.2 Discretização do controlador Transformada Z

5.1.3 Implementação do Controlador usando o Arduino Nano

5.2 Projeto de Controle por Espaço de Estados

5.2.1 Obtendo o Controlador

5.2.2 Discretização do controlador Transformada Z

5.2.3 Implementação do Controlador usando o Arduino Nano

5.3 Interface Gráfica Plotagem dos Estados do Sistema

5.3.1 Obtendo o Controlador

5.3.2 Discretização do controlador Transformada Z

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CONCLUSÃO

7.0.1 Considerações Finais

7.0.2 Trabalhos Futuros

REFERÊNCIAS

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Brasil: Pearson Education do Brasil, 2014. Citado na página 6.